

# Współczesne trendy w projektowaniu układów nośnych pojazdów specjalnych typu Trike „REWACO”

Marek Fligiel

## Streszczenie

W pracy rozpatruje się proces projektowania konstrukcji nośnych pojazdów specjalnych trójkołowych „Trike”. Omawiane są wymagania i czynniki wpływające, na jakość konstrukcji z uwzględnieniem etapów projektowania. Wyodrębniono podział ram nośnych. Na przykładzie platformowej ramy nośnej dzielonej typu RF, rozpatrzono proces konstruowania na etapie projektowania wytrzymałościowego z uwzględnieniem intensywności deformacji. Rozpatrzono intensywność oddziaływań obciążeń dynamicznych na konstrukcję nośną. Przeanalizowano oddziaływania obciążeń dynamicznych wpływających na postacie i częstotliwości kołowe drgań własnych. Do obliczeń wykorzystano metodę elementów skończonych w implementacji programu Ansys.

**Słowa kluczowe:** pojazd specjalny trójkołowy, rama nośna, proces projektowania, analiza wytrzymałościowa, analiza modalna, modelowanie.

## Wstęp

Od czasu, kiedy człowiek zaczął budować maszyny i urządzenia, coraz bardziej skomplikowane stawały się ich konstrukcje nośne. Przykładem najprostszej konstrukcji nośnej jest dźwignia jedno lub dwustronna. Konstrukcja nośna jest strukturą maszyn lub urządzeń, składająca się z elementów konstrukcyjnych, zapewniających jej stateczność i przenoszących na podłoże (podporę) ciężar własny struktury oraz obciążenia funkcjonalne statyczne i dynamiczne działające na elementy nośne tej struktury. Elementy nośne konstrukcji zapewniają jej odpowiednią wytrzymałość statyczną i dynamiczną i są wieżami dla obciążeń zewnętrznych czynnych, natomiast elementy pasywne, jeżeli występują, mogą wpływać na stateczność i postacie główne drgań własnych i wymuszonych. Aby konstrukcja nośna spełniała stawiane jej wymogi funkcjonalne i ekonomiczne w stopniu równym lub wyższym [1] niezbędny jest dokładny plan całego przedsięwzięcia. W miarę jak postępuje rozwój w kinematyce i dynamice ruchu elementów wykonawczych maszyn, całych linii technologicznych oraz w inżynierii materiałowej, konstrukcje nośne maszyn i urządzeń stawały się coraz bardziej skomplikowane. W związku z tym tradycyjny sposób konstruowania polegający na metodzie prób i weryfikacji doświadczalnej konstrukcji maszyn stawał się uciążliwy i długotrwały i mało ekonomiczny. W celu skrócenia czasu projektowania i wdrożenia maszyny dokonuje się coraz więcej niezbędnych obliczeń i unormowań. Normy ustanawiane przez rozmaite organizacje nadzoru zmuszają konstruktorów do projektowania z takich materiałów i w taki sposób, aby projekt konstrukcyjny otrzymał odpowiednie atesty i certyfikaty, aby cały ustrój maszyny czy urządzenia zasługiwał na miano niezawodnej i bezpiecznej.

Rozwój techniki komputerowej przyspieszył w znacznym stopniu podejście i rozwój metod projektowania. Rozwój metod i sposobów ich realizacji ma szczególnie duży wpływ na kon-

strukcje przeznaczone do realizacji w ramach produkcji jednostkowej lub małoseryjnej, gdzie koszty projektu stanowią znaczący udział w całych kosztach wytworzenia prototypu i produkcji. W miarę jak powstawały komputery o coraz większej mocy obliczeniowej, ich możliwości otworzyły przed konstruktorami nowy rozdział w tworzeniu maszyn i urządzeń. Rozwój nowo powstałych dziedzin wspomaganie prac inżynierskich (Komputerowe Wspomaganie Inżynierskie CAE, Komputerowe Wspomaganie Projektowania CAD, Komputerowe Wspomaganie Wytwarzania CAM), pozwolił na projektowanie coraz bardziej skomplikowanych konstrukcji. Metoda „prób i błędów” i przybliżone obliczenia analityczne zostały wyparte przez znacznie dokładniejsze komputerowe symulacje wykonywane w programach takich jak Ansys, I-Deas, Pro engineer i innych, a proces pracy inżynierskiej został udoskonolony i wpłynął na jakość tworzonego wyrobów.

Po zaprojektowaniu wirtualnego modelu maszyny lub jej części, błędy i niedoskonałości konstrukcji są szybko zauważalne a wyeliminowanie ich następuje przed urzeczywistnieniem materialnym konstrukcji.

Szybki rozwój motoryzacji i różnorodność modeli pojazdów postawił przed konstruktorami nowe wyzwania. Wzrost rozmiarów i masy pojazdów uświadomił projektantom, że elementem pojazdu, jakim jest konstrukcja nośna pojazdu należy poświęcić więcej uwagi. Głównym zadaniem konstrukcji nośnej jest przeniesienie obciążeń oddziaływających na dany element maszyny lub maszynę a także utrzymanie niezmienności topologicznej rozmieszczenia wykonawczych węzłów kinematycznych maszyny czy urządzenia.

## 1. Pojazdy specjalne trójkołowe „Trike”

Pojazdy specjalne trójkołowe „Trike” produkowane w Koszalinie w „rewaco internacional” [2], głównie, ale nie tylko, są

pojazdami skierowanymi dla odbiorców o wyszukany, konsekwentnym spojrzeniu na pojazd (rys. 1).



**Rys. 1.** Trike RF1-ST. Rama dzielone typu RF

Takie potrzeby klientów wymogły inne spojrzenie na konstrukcję i wykonanie, a także estetykę produktu. Przyjęte założenia finalnego pojazdu spowodowały, że powstał wyrób spełniający najwyższe międzynarodowe wymagania techniczne, estetyczne i użytkowe.

Pojazdy wykonane są z materiałów bardzo dobrej jakości o dużej trwałości. Układ napędowy trójkołowców spełnia wysokie wymagania norm europejskich dotyczących trwałości i bezpieczeństwa. Należy bardzo wysoko ocenić konstrukcję nośną pojazdów. Wykonana jest ona z kształowników zimnowalcowanych i pomalowanych proszkowo. Elementy takie jak opatentowany system wspomagania trąkcyjnego, widelec przedni trapezowy, sprężyny amortyzatorów Bilstein itd. oraz osprzęt pojazdu wykonano z materiałów nierdzewnych w wielu przypadkach polerowanych lub pokrywanych warstwami chromu lub niklu o dużej estetycznej własności. Karoseria wykonana jest z laminatu poliestrowo-szklanego, w szerokiej gamie kolorów do wyboru przez użytkownika. Fotele i siedzenia są ergonomiczne, wykonane estetycznie z materiałów o dobrych własnościach użytkowych.

Jednostkowa, małoseryjna produkcja wielu wersji pojazdów „Trike” o różnych osiągnięciach pokazuje zakres rozwiązywania problemów konstrukcyjnych i technologicznych. Wszystkie wersje pojazdów spełniają wymagania jakości i bezpieczeństwa stawiane przez europejskie instytucje opiniujące pojazdy o czym świadczą certyfikaty Unii Europejskiej oraz dopuszczenie ich do ruchu w państwach poza Europą. Pojazdy w 100% eksportowane są do krajów Unii Europejskiej i innych państw świata – Australii, USA, Kanady itd. Zapotrzebowanie na tego typu pojazdy rośnie, co jest wynikiem bardzo dobrej europejskiej jakości produktu jak i zwiększającym się zapotrzebowaniem klientów na oryginalne, niepowtarzalne towary najwyższej jakości.

## 2. Układ nośny pojazdów specjalnych „Trike”

Zgodnie z literaturą [3, 4] rama pojazdu jest konstrukcją nośną i zespołem wiążącym w konstrukcyjną całość zespoły podwozia i nadwozia pojazdu, resorowanej i nieresorowanej masy pojazdu.

Stosowane obecnie w trójkołowcach rami mimo znacznych różnic konstrukcyjnych pojazdów są ramami kratownicowymi i można zaliczyć je do dwóch grup:

1. rami zamknięte platformowe, których przednia część ma kształt wieloboku,
  - platformowe całościowe - typu FX,
  - platformowe dzielone - typu RF,
2. rami szczałkowe otwarte - bez dolnej części, której zadaniem jest przejmowanie zespołu napędowego - typu CT.

W klasycznym wykonaniu rama stanowi w przybliżeniu prostokątny szkielet, składający się z dwóch belek podłużnych, tak

zwanych podłużnic, oraz kilku belek poprzecznych – poprzeczek, połączonych ze sobą nitami, śrubami bądź spawanych. Na rys.2. pokazano jedną z pierwszych klasycznych ram nośnych trójkołowca.



**Rys. 2.** Klasyczna rama trójkołowca

Na takiej ramie wsparte jest nadwozie oraz przymocowane są do niej wszystkie mechanizmy napędowe i jezdne. Rami takie posiadają dużą masę, która wpływa na własności trakcyjne pojazdu i jego dynamikę.

Na rys. 3 przedstawiono ramę platformową całościową typu FX, wykonaną z kształowników o przekroju kwadratowym i elementów blaszanych. Kształtowniki łączone są z blaszami, jako elementy nośne, elementy nośne blaszane spełniają jednocześnie rolę zbiornika paliwa. Rami nośne tego typu posiadają zwiększoną masę i nastroczają problemy przy ustawianiu geometrii kół pojazdu.



**Rys. 3.** Rama platformowa całościowa typu FX



**Rys. 4.** Rama platformowa dzielona typu RF

Na rys. 4 przedstawiono ramę platformową dzieloną typu RF. Rama ta może być wykonana z kształtowników o przekroju kwadratowym lub okrągłym rurowym. Rama ma cechy uniwersalnej, gdyż poprzez długość łączenia można dostosować ją do większej liczby wytwarzanych różnorodnych trójkołowców.

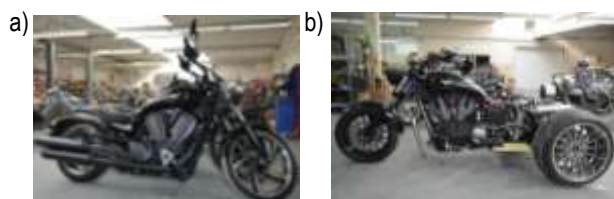
Ramy nośne typu RF posiadają wiele zalet, między innymi ich sztywność przypadająca na jednostkę masy jest większa niż w ramach typu FX.

Na rys. 5 pokazano ramę typu szczątkowego CT. Rama spełnia wymogi konstrukcji nośnej i stosowana jest w trójkołowcach, których bazową konstrukcją jest motocykl.



Rys. 5. Rama szczątkowa typu CT

Na rys. 6a przedstawiono motocykl a na rys. 6b, wykorzystanie ramy CT jako konstrukcji nośnej. W trójkołowcach budowanych na bazie motocykla elementami przenoszącymi siły wewnętrzne w konstrukcji nośnej, oprócz ramy szczątkowej są elementy układu napędowego i jezdne.



Rys. 6. Motocykl i trójkołowiec z ramą typu CT

### 3. Projektowanie ram nośnych

Projektowanie ram nośnych i ich elementów w pojazdach specjalnych typu „Trike” nie jest opisane w literaturze. Większość takich konstrukcji specjalnych jest chroniona patentami. Jedynymi pozycjami dotyczącymi obliczeń wytrzymałościowych są publikacje traktujące o ogólnych zasadach badań i obliczeń wytrzymałościowych jak i różnego rodzaju poradniki czy tablice. Trudno jest również spotkać literaturę na temat zasad czy samego projektowania takich konstrukcji. Brak informacji literaturowych jest głównie spowodowany brakiem badań czy obliczeń układów nośnych i zawieszenia pojazdów specjalnych. Większość z popularnych konstrukcji jest projektowana na podstawie doświadczeń projektantów, którzy wzorują się na wcześniejszych swoich produktach lub innych podobnych.

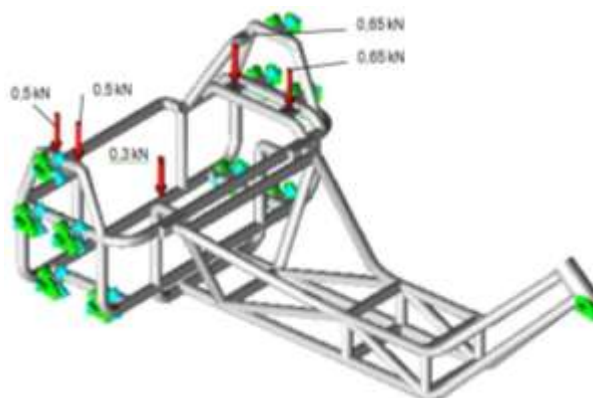
Analiza wytrzymałościowo-sztywnościowa ramy nośnej pojazdu trójkołowego stanowi podstawę do opracowania metodyki i obliczeń prowadzonych w fazie projektowania jak i w badaniach eksperymentalnych.

Podstawowym etapem projektowania wytrzymałościowego jest wyznaczenie statycznych maksymalnych naprężeń w ramie. Dzięki temu określa się punkty krytyczne (kluczowe punkty), które

stanowią jakość konstrukcyjną. Punkty krytyczne są miejscami, w których mogą wystąpić w pierwszej kolejności trwałe deformacje w ramie lub w sytuacji ekstremalnej pęknięcie ramy. Drugim bardzo ważnym elementem analizy wytrzymałościowo-sztywnościowej są naprężenia wywoływane przez obciążenia dynamiczne. Równie ważna jest analiza zmęczeniowa, gdyż obliczenia statyczne z uwzględnieniem masy ukazują tylko stan naprężeń badanego elementu w stanie spoczynku lub gdy pojazd porusza się ruchem jednostajnym po torze prostoliniowym. Obliczenia dynamiczne pokazują wzrost naprężeń od obciążeń eksploatacyjnych, techniki jazdy i wpływu nierówności drogi. Analiza zmęczeniowa pokazuje nam jak zachowuje się rama pod działaniem cyklicznego obciążenia, zbliżonego do obciążeń, na jakie narażona jest ona podczas jazdy. Ważną kwestią jest wyznaczenie dopuszczalnej wielkości rozpraszania energii. Ma to znaczenie z tego względu, że analiza statyczna nie uwzględnia sił bezwładności. O sztywności ramy decyduje rozłożenie względnej potencjalnej energii deformacji oraz długość działania sił wewnętrznych w ramie [5]. Odporność ramy na impuls siły przy zderzeniu ma decydujące znaczenie w drogowych sytuacjach krytycznych związanych z kolizją pojazdu. Kolejną istotną analizą, z punktu widzenia komfortu jazdy i bezpieczeństwa, jest analiza częstości drgań własnych ramy i jej harmonicznych. Częstość drgań własnych ramy powinna być znacznie wyższa od częstości występowania nierówności na drodze i wymuszeń z układu napędowego trójkołowca.

### 4. Przykład analizy wytrzymałościowej ramy platformowej – typu RF

Rama nośna pojazdu trójkołowego „Rewaco” jest konstrukcją prętową. Zbudowana jest z rur stalowych wykonanych ze stali St3. Średnica zewnętrzna rur wynosi 38 mm, a grubość ścianki 2 mm. Jest to konstrukcja dwuczęściowa (rys. 4). Składa się z części tylnej (tzw. kosza), w którym znajduje się układ napędowy i części przedniej. W części przedniej znajduje się przestrzeń dla kierowcy i pasażera oraz układ kierowniczy. Obie części ramy są połączone za pomocą śrub. Rama jest konstrukcją spawaną. Wszystkie krzywizny wykonane są zgodnie z założeniami, za pomocą giętarki numerycznej. Model obliczeniowy do analizy został wykonany w skali 1:1. Obciążenia ramy i więzy pokazano na rys. 7.

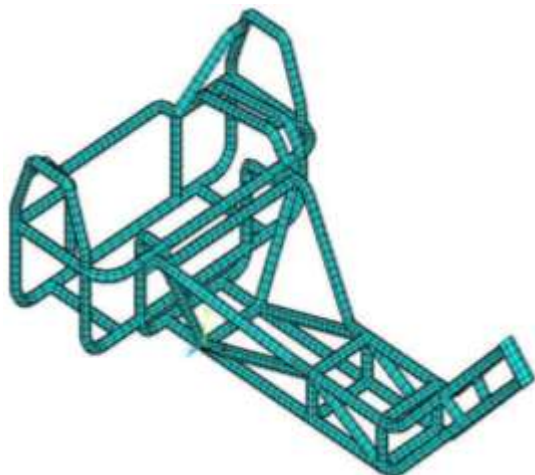


Rys. 7. Rama nośna, siły zewnętrzne czynne i warunki brzegowe

Na podstawie znajomości obciążeń zewnętrznych konstrukcji można przypuszczać, że miejscami o krytycznej wartości naprężeń będą miejsca zamocowania jednostki napędowej.

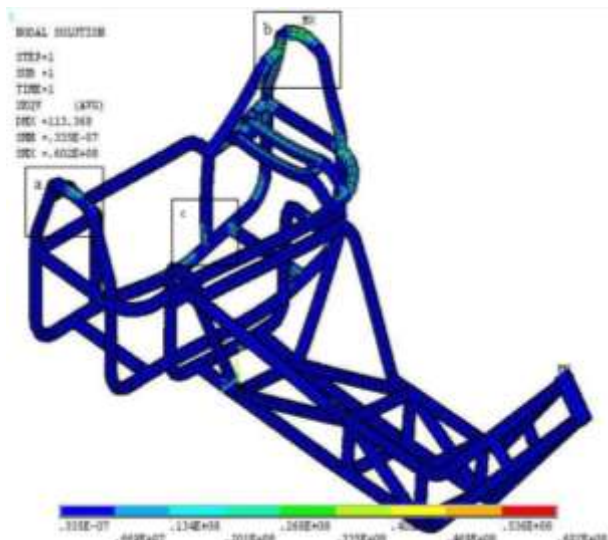
Obliczenia ramy wykonano w programie ANSYS. Do obliczeń przyjęto element belkowy BEAM 189, posiada on sześć stopni swobody w każdym węźle. Podział na elementy skończo-

ne pokazano na rys. 8. Silnik jak i skrzynia biegów są zamocowane w trzech punktach, więc tam przypuszczalnie będą największe naprężenia. Można oczekiwać, że rama wykonana ze stali St3 wytrzyma obciążenia statyczne jak i dynamiczne.



**Rys. 8.** Podział na elementy skończone ramy typu RF

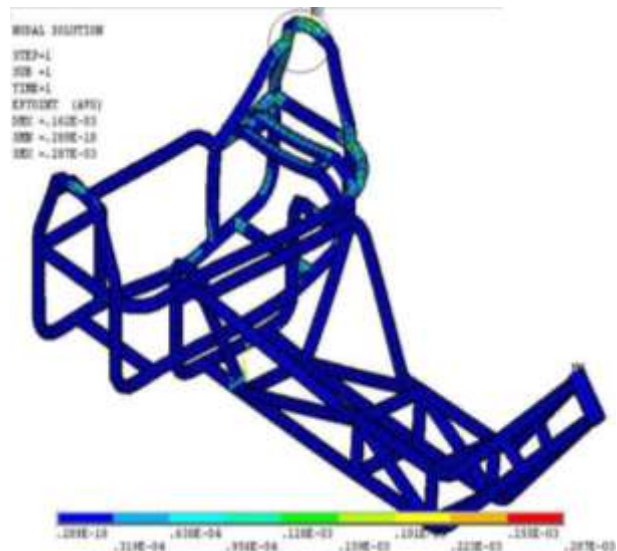
Rysunek 9 przedstawia rozkład naprężeń zredukowanych Hubera-Mises'a. Największe naprężenia występują w miejscach a, b, i c mocowania układu napędowego silnika i skrzyni biegów i osiągają wartość przekraczającą 60 MPa.



**Rys. 9.** Rozkład naprężeń zredukowanych Hubera-Mises'a: a, b, c - mocowanie układu napędowego: silnika i skrzyni biegów

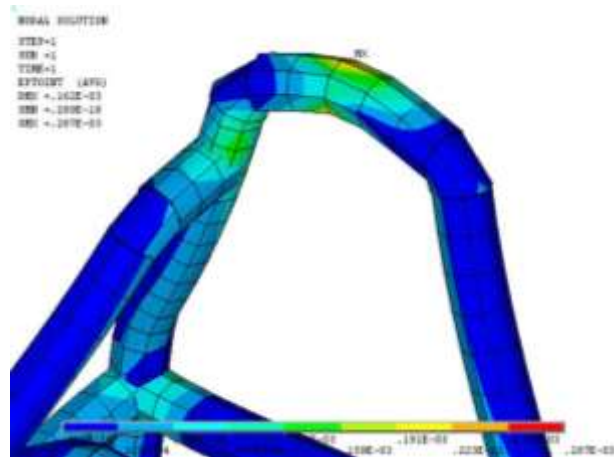
Stan obciążeń dynamicznych ramy jest stanem złożonym naprężeń, gdyż obciążenia dynamiczne siłami bezwładności zależą od kierunku ruchu trójkołowca i techniki jazdy prowadzącego pojazd. Mając na uwadze, że naprężenia rzeczywiste, wywołane obciążeniami dynamicznymi, mogą być 2÷5 – krotnie większe od obliczonych wartości [3], przy konstruowaniu ram za podstawę obliczeń przyjmuje się obciążenia odpowiadające ilorazowi granicy plastyczności stali i współczynnika bezpieczeństwa wynoszącego  $3,5 \div 4$ . Z przeprowadzonych obliczeń dla współczynnika bezpieczeństwa 4 wynika, że naprężenia Hubera-Mises'a prze-

kroczyły dopuszczalną wartość równą granicy plastyczności dla 5-cio krotnych obciążeń dynamicznych.



**Rys. 10.** Stan deformacji ramy RF - intensywność deformacji

Największe deformacje krytyczne wystąpiły w miejscu mocowania amortyzatorów, to jest połączenia masy resorowanej z nieresorowaną. Na rys. 10 zaznaczono okręgiem miejsce występowania deformacji krytycznych, a na rys. 11 powiększenie tego miejsca.



**Rys. 11.** Miejsce deformacji krytycznej ramy RF - intensywności deformacji

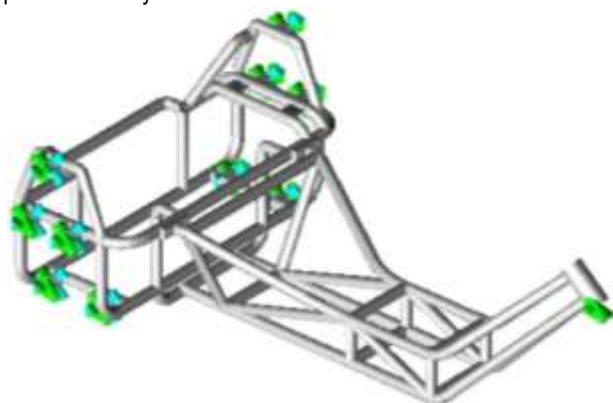
Z analizy punktów wystąpienia największych naprężeń zredukowanych i największej deformacji (rys. 9 miejsce b, rys. 10 i rys. 11) wynika, że miejsce to należało wzmocnić pod względem deformacji i naprężeń. Wzmocnienie uzyskano poprzez zwiększenie grubości ścianki o 1 mm przekroju rurki i w zależności od rodzaju montowanego układu napędowego i wielkości resorowanej masy, nakładką.

Przed wzmocnieniem deformacja krytyczna wynosiła około 0,3 mm. Dopuszczalną wartością jest wartość 0,002 wynikająca z granicy plastyczności. Jest to granica, powyżej której odkształcenia sprężyste stają się odkształceniami plastycznymi. Zwiększając pięciokrotnie obciążenie statyczne po wprowadze-

niu wzmocnienia miejsca krytycznego deformacji, maksymalna wartość odkształceń wyniosła 0,0014, co jest wartością dopuszczalną a naprężenia wynosiły 48 MPa.

#### 4. Analiza modalna ramy platformowej – typu RF

Do analizy modalnej użyto model graficzny i podział na elementy skończone jak w analizie statycznej. Nałożone więzy pokazano na rys. 12.

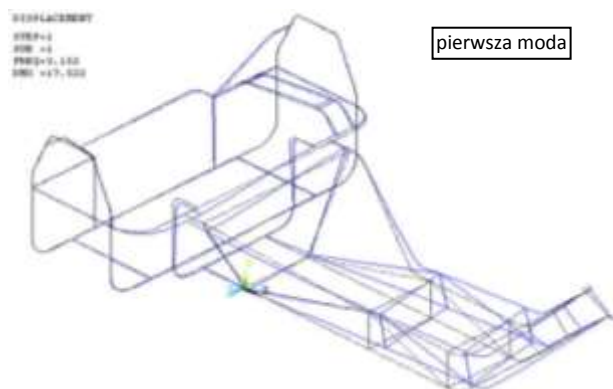


Rys. 12. Model ramy do analizy modalnej z nałożonymi więzami

Celem przeprowadzenia analizy modalnej jest obliczenie częstości drgań własnych oraz wyznaczenie postaci głównych drgań, tj. określenie własności dynamicznych ramy nośnej RF.

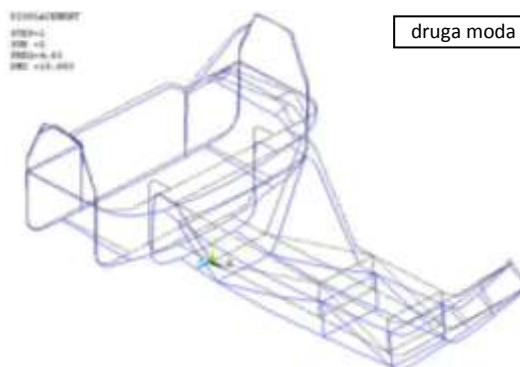
Na podstawie analizy modalnej, poprzez rozwiązanie zadania własnego, możemy określić poprawność pracy trójkołowca, zmniejszyć ryzyko nagłej awarii oraz zredukować poziom wytwarzanego hałasu. Ponadto analiza modalna umożliwia porównanie częstości wymuszeń w układzie napędowym i jezdnym z częstościami drgań własnych ramy. Pokrywanie się tych częstości prowadzi do zjawiska rezonansu, co wiąże się z gwałtownym narastaniem amplitudy deformacji ramy a tym samym może doprowadzić do niestabilności ruchu trójkołowca. Rama nośna stanowi masę resorowaną trójkołowca.

Z obliczeń wynika, że częstotliwość kolejno, pierwszej drugiej i trzeciej postaci głównych drgań własnych ramy wynosi odpowiednio: 13,3; 39 i 23,2 Hz. Na rys. 13, 14 i 15 pokazano postaci główne drgań (mody).

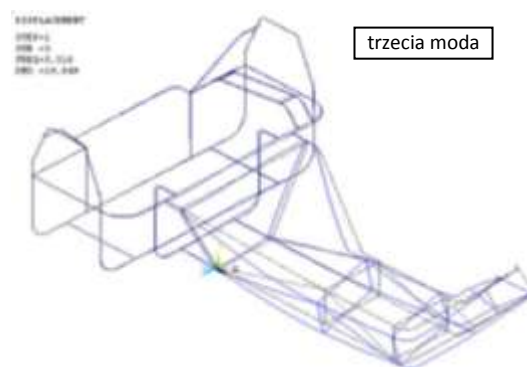


Rys. 13. Pierwsza postać drgań głównych, częstość kołowa 83,4 s<sup>-1</sup>

Analiza modalna pozwoliła wyznaczyć częstość drgań własnych ramy nośnej jak i jej główne postaci. Częstość ta jest jedną z podstawowych wartości wejściowych do obliczania częstości drgań własnych całego zawieszenia.



Rys. 14. Druga postać drgań głównych, częstość kołowa 122,5 s<sup>-1</sup>



Rys. 15. Trzecia postać drgań głównych, częstość kołowa 146,1 s<sup>-1</sup>

Jeżeli obciążenia dynamiczne, kinematyczne i bezwładnościowe będą występowały z częstotliwością zbliżoną do częstości drgań własnych podwozia i ramy nośnej to będzie miało miejsce zjawisko rezonansu. Podstawowe wymagania stawiane zawieszonom pojazdów samochodowych, z pominięciem warunków eksploatacji, w celu zapewnienia żądanej płynności jazdy, stabilności i niezawodności mówią, że wymagana częstotliwość drgań własnych masy resorowanej powinna wynosić 0,7 – 1,2 Hz. Uzyskane wartości są znacznie wyższe, dzięki czemu w konstrukcji ramy nie wystąpi rezonans.

#### 5. Podsumowanie

Poziom rozwoju technik komputerowych pozwala na wykonywanie bardzo skomplikowanych, a zarazem dokładnych na poziomie inżynierskim obliczeń i symulacji różnych zjawisk fizycznych. Obecnie obliczenia i symulacja komputerowa jest nieodzowną częścią procesu projektowania elementów maszyn i urządzeń technicznych.

Obliczenia i analiza a także badania symulacyjne na etapie projektowania dają pewność wysokiej jakości projektowanej konstrukcji. Komputerowe wspomaganie pracy konstruktorów staje się powszechne i znacznie skraca czas projektowania, jednak dla otrzymania wysokiej jakości konstrukcji należy opracować plan przedsięwzięcia: projektowania i wytworzenia wyrobu. Niniejsza praca ma na celu uporządkowanie planu projektowania konstrukcji nośnej pojazdów specjalnych trójkołowych „Trike”.

## Bibliografia

1. Osinski Z., Wróbel J.: *Teoria konstrukcji maszyn*. PWN (1982).
2. [www.rewaco.de](http://www.rewaco.de)
3. Akopian R.: *Budowa pojazdów samochodowych*, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów (1995).
4. Orzelowski S.: *Budowa podwozi i nadwozi samochodowych*, WSiP Warszawa (1980).
5. Fligiel M.: *Formation of the most optimal supporting construction in a two-dimensional state of load*. – International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 2012, vol.17, No.3, pp.799-810. University Press, Zielona Góra, Poland

## Present-day trends in designing the supporting structures of special vehicles of Trike “REWACO” type

### Abstract

*In this study, the designing process of the supporting structures of special “Trike” three-wheeled vehicles is discussed. The requirements and factors are considered that have an influence on the quality of the structure taking designing stages into consideration. A division was presented of support frames. On the example of a sectional platform support frame of RF type, the constructing process was considered at the stage of strength designing taking into account the intensity of deformations. The intensity was examined of the impact of dynamic loads on the supporting structure. The impacts of dynamic loads were analyzed that have an influence on the forms and angular frequencies of free vibrations. The finite elements method was used in the calculations in the implementation of Ansys software.*

**Key words:** special three-wheeled vehicle, support frame, designing process, strength analysis, modal analysis, modelling.

### Autor:

Dr inż. **Marek Fligiel** – Politechnika Koszalińska.